

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉCOULEMENT DE DEUX FLUIDES IMMISCIBLES ENTRE DEUX CYLINDRES COAXIAUX EN ROTATION.

N. MERABET^a, A. MAHAMDIA^b

Laboratoire de Thermodynamique et systèmes énergétiques, Faculté de Physique -USTHB, BP N° 32
El Alia- Alger, ALGERIE

E-mail : merabetnarimene@yahoo.fr et mahamdia_ammam@yahoo.fr

Résumé :

Le présent travail, à caractère expérimental, porte sur l'étude des instabilités hydrodynamiques d'un écoulement visqueux dans un espace annulaire cylindrique partiellement rempli de deux fluides immiscibles. On vise particulièrement la mise en évidence l'effet de la hauteur H_2 du fluide léger sur l'apparition des deux premières instabilités de Taylor-Couette au sein du deuxième fluide, plus dense, de hauteur H_1 . Ces instabilités sont caractérisées respectivement par les nombres de Taylor critiques T_{c1} et T_{c2} dont on étudie l'évolution en fonction des hauteurs de remplissage H_1 et H_2 . Par une technique de visualisation, on détermine le nombre de cellules (n) et le nombre d'ondes azimutales (m) qui apparaissent dans le fluide le plus dense de hauteur H_1 situé en dessous. Un tel dispositif trouve une vaste application dans le domaine industriel.

Abstract:

This work, with experimental character, concerns the study of hydrodynamic instabilities of a viscous flow, in a cylindrical annular space partially filled of two immiscible fluids. We aim particularly the description of the H_2 length effect of the light fluid on the appearance of the two first Taylor-Couette instabilities within the second fluid, which is denser, and with H_1 length. These instabilities are characterized respectively by the criticized numbers of Taylor T_{c1} and T_{c2} which we study the evolution according to the lengths of filling H_1 and H_2 . By a technique of visualization, we determine the number of cells (n) and the number of the azimuth waves (m) which appear in the densest fluid with H_1 length, located below. Such this device finds a vast application in the industrial field.

Mots clefs : Taylor Couette flow, instabilités, cellules de Taylor, visualisation.

Nomenclature

R_1, R_2 : Rayon du cylindre intérieur et extérieur.	$\Gamma = H/d$: Taux de remplissage (facteur d'aspect).
H_1, H_2 : Hauteur du premier et deuxième liquide.	$m = 2\pi R_2/b$: Nombre d'onde circonférentielle.
$d = R_2 - R_1$: Largeur de l'espace annulaire.	$\delta = d/R_1 = 0,171$: Jeux radial.
n : Nombre de cellules axiales.	$Re = \Omega_1 R_1 d/\nu$: Nombre de Reynolds.
Γ_1, Γ_2 : Taux de remplissage de hauteur H_1 et H_2 .	b : Longueur d'onde circonférentielle.
$T_a = Re\sqrt{\delta}$: Nombre de Taylor.	

1 Introduction

L'étude de l'écoulement de Taylor- Couette entre deux cylindres concentriques en rotation, est un problème classique, depuis les travaux fondateurs de **G.I. Taylor [1]**, n'a pas cessé de susciter l'intérêt de nombreux chercheurs. Le présent travail consiste à étudier le système ainsi défini, partiellement rempli de deux fluides non miscibles superposés. Ce type d'écoulement trouve, de par sa simplicité de réalisation et d'adaptation, de vastes applications industrielles et en particulier dans le génie des procédés.

Les prolongements à l'étude des instabilités de deux fluides immiscibles entre deux cylindres coaxiaux, ont été entrepris par **D. D. Joseph et al [2] [3]**. Les auteurs ont étudié la stabilité de deux fluides, entre les cylindres coaxiaux en position horizontale en négligeant l'effet de pesanteur. **Gretchen Baier et al [4]** ont effectué une recherche par voies théorique et expérimentale, sur l'instabilité centrifuge de deux fluides immiscibles radialement stratifiés entre deux cylindres concentriques en mouvement contrarotatif. Leur étude consistait à déterminer un critère de stabilité de deux fluides non visqueux.

A. L. Yarin and P. Z. Bar-Yoseph [5] ont présenté par voie numérique l'étude de l'écoulement dans un anneau cylindrique horizontal. Ils se sont en particulier intéressés à l'effet de la convection naturelle sur le transfert de masse au niveau de l'interface des deux fluides non-miscibles. **I. Jie et R. Yuriko [6]** ont également effectué une étude numérique des perturbations périodiques sur l'écoulement de Taylor-Couette de deux fluides immiscibles. Aussi les instabilités de l'écoulement de vortex de Taylor dans un système asymétrique avec deux fluides immiscibles, en géométrie verticale a été effectuée par **Toya et al [7]**.

Le présent travail vise la détermination des nombres de Taylor critiques correspondant aux différentes transitions, les nombres de cellules axiales (n) et azimutale (m). Dans une première étape, on se propose de retrouver par la technique de visualisation, les principaux résultats connus en géométrie de Taylor-Couette en utilisant un seul fluide combiné à l'influence de la surface libre pour plusieurs hauteurs. Dans une seconde étape on ajoute un autre fluide afin d'étudier l'effet de la hauteur H_2 du fluide léger, situé au dessus d'un fluide plus dense de hauteur H_1 .

2 Dispositif expérimental et conditions d'essais

Le dispositif utilisé pour la présente étude est constitué de deux cylindres coaxiaux verticaux, réalisés en plexiglas permettant la visualisation de l'écoulement. Le cylindre intérieur de rayon $R_1 = (35 \pm 1)$ mm, de hauteur $H_1 = (120 \pm 1)$ mm est entraîné par un moteur à courant continu. Le cylindre extérieur de rayon $R_2 = (41 \pm 1)$ mm, et $H_2 = (145 \pm 1)$ mm, est maintenu fixe. Les deux cylindres délimitent un espace annulaire $d = 6$ mm. La surface supérieure du fluide est libre (FIG 1).

L'étude expérimentale du mouvement des deux fluides immiscibles est basée sur une technique de visualisation. La première solution de hauteur H_1 , constituée d'eau distillée et de kalliroscope. Le second fluide de hauteur H_2 est une solution composée d'huile de vaseline, d'éther de pétrole et de poudre d'aluminium. Dans les conditions expérimentales de température ($T = 20^\circ\text{C}$) les viscosités et les masses volumiques des deux fluides, supposés newtoniens, sont respectivement $\nu_1 = 0,963 \cdot 10^{-6}$ Pa.s, $\nu_2 = 5,80 \cdot 10^{-6}$ Pa.s, $\rho_1 = 981,96 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_2 = 785,41 \text{ kg/m}^3$.

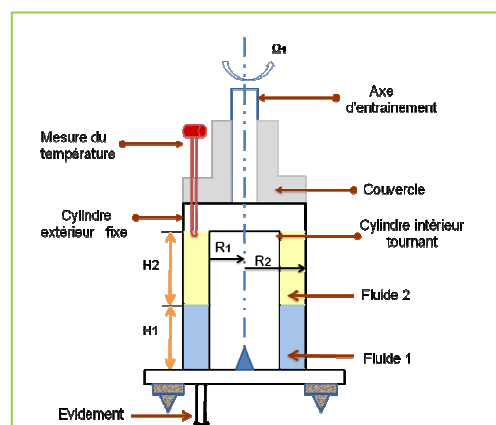


FIG. 1 – Schéma du dispositif expérimental.

3 Résultats et discussion

3.1 Etude des instabilités avec un seul fluide

L'objectif principal de cette partie consiste à mettre en évidence les différentes instabilités hydrodynamiques de Taylor- Couette, menées par l'influence du taux de remplissage Γ , et la surface libre. Nos expériences sont menées avec un taux de remplissage Γ situé dans la plage $7,5 < \Gamma < 20$. En augmentant très lentement la vitesse de rotation du cylindre intérieur Ω_1 , on observe les régimes d'écoulement suivants :

- 1 - Pour un nombre de Taylor Ta , $0 < Ta < Tc_1$, le régime d'écoulement est laminaire stable défini par un mouvement homogène au sein du fluide, en absence de toute perturbation (FIG. 2a).
- 2 - Pour un nombre de Taylor critique $Ta = Tc_1$, on observe l'apparition des cellules de Taylor constituant des ondes axiales de type stationnaires. Cette structure est due au déséquilibre entre la force centrifuge et le gradient de pression, qui représente la première rupture de symétrie (FIG. 2b).
- 3 - Le régime de la deuxième instabilité, appelé aussi «Wavy Vortex Flow », est caractérisé par l'oscillation des cellules de Taylor dans la direction circonférentielle pour un nombre de Taylor critique $Ta = Tc_2$ (FIG. 2c).

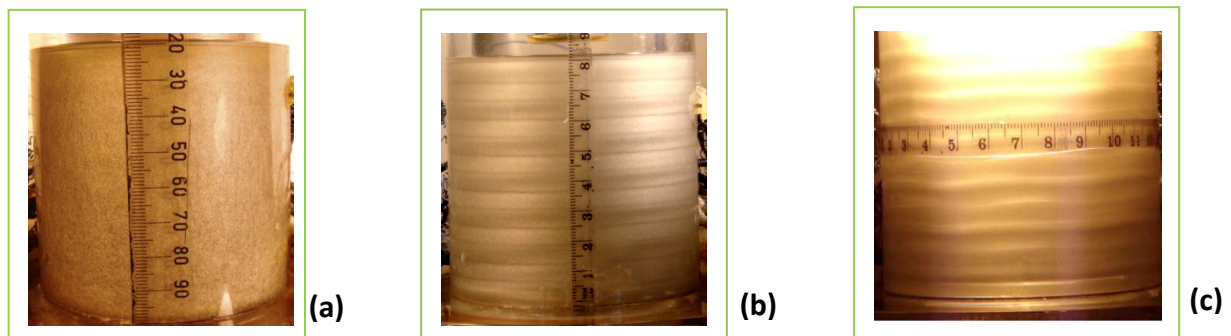


FIG. 2 – Les instabilités observées avec un seul fluide pour $\Gamma=13,33$. (a) Régime laminaire stable $Ta < 41$, (b) Première instabilité (cellules de Taylor) $Ta = 45$, (c) deuxième instabilité ou régime d'ondes azimuthales $Ta = 83,58$.

L'analyse des premiers résultats obtenus nous a permis les constatations suivantes:

- L'apparition des cellules de Taylor s'effectue toujours pour la valeur $Tc_1 = 41 \pm 2$ (FIG. 3a). J.A.Cole [9] a montré que la valeur de Tc_1 varie peu lorsque le facteur d'aspect Γ diminue. Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par A. Mahamdia [8].
- La longueur d'onde axiale λ reste pratiquement inchangée, lorsque le facteur d'aspect Γ varie ; elle vaut deux fois la dimension de l'espace annulaire d , $\lambda = 2d \approx (12 \pm 1) \text{ mm}$.
- Le nombre de cellules axiales (n) croît lorsque le taux de remplissage augmente (FIG. 3b).
- L'apparition de l'onde azimuthale, caractérisée par le nombre de Taylor critique Tc_2 , est retardée lorsque le taux de remplissage diminue (FIG. 3a). J. A. Cole [9] a trouvé que le nombre de Taylor caractérisant l'établissement du régime d'ondes azimuthales s'accroît considérablement lorsqu'on réduit la hauteur de l'écoulement. Le même résultat est confirmé par A. Mahamdia [8].
- Pour un taux de facteur d'aspect $\Gamma_c < 10$, la deuxième instabilité (onde azimuthale) n'est pas observée.

La figure 3 illustre les variations des nombres de Taylor critiques Tc_1 et Tc_2 , correspondant à l'apparition des deux premières instabilités ainsi que, l'évolution du nombre de cellules axiales (n) et ondes circonférentielles (m) en fonction du taux facteur d'aspect Γ .

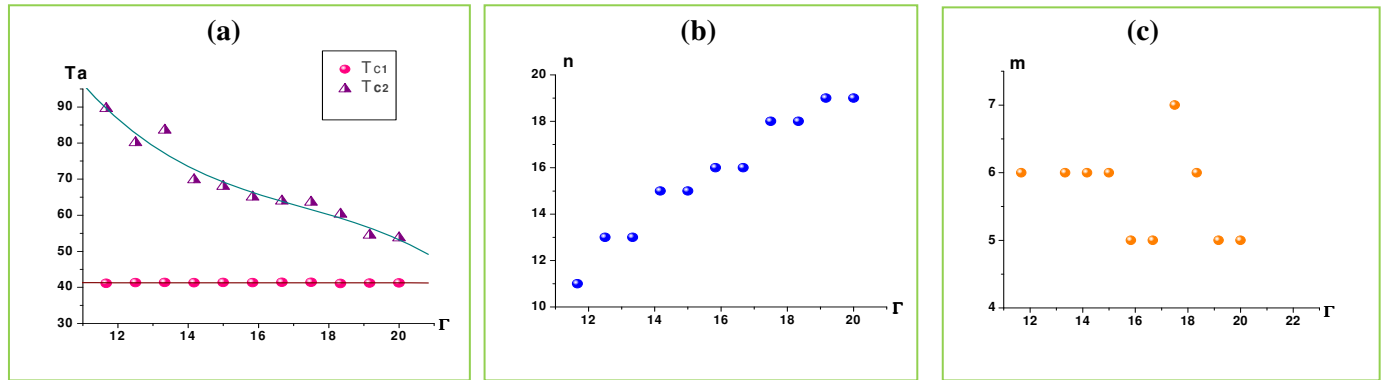


FIG. 3 – Les courbes obtenues dans le cas d'un seul fluide, (a) : Variation du nombre de Taylor critique en fonction du taux de remplissage Γ . (b) : Evolution de cellules axiales (n) en fonction du taux de remplissage Γ . (c) : Evolution du nombre d'ondes circonférentielles (m) en fonction du taux de remplissage Γ .

3.1.1 Variation du nombre d'onde axiale (n) et circonférentielle (m) en fonction du nombre de Taylor Ta

La figure 4 représente la variation du nombre d'ondes circonférentielles m , et cellules axiales n en fonction du nombre de Taylor Ta , à plusieurs taux de remplissage Γ .

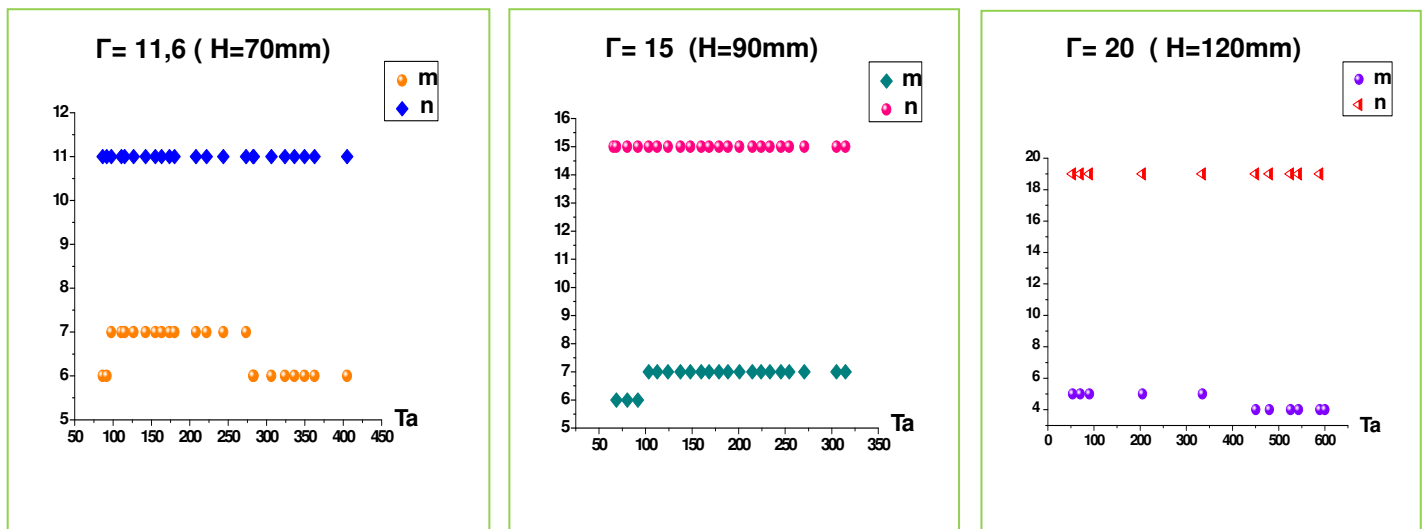


FIG. 4 – Evolution du nombre d'ondes circonférentielles et cellules axiales, en fonction du nombre de Taylor pour $\Gamma = 11,6$, $\Gamma = 15$ et $\Gamma = 20$.

Le nombre de cellules axiales (n) n'est pas affecté par la variation du nombre de Taylor (Ta).

L'onde azimutale apparaît à $m = 6$, dans le cas des hauteurs $H = 70\text{mm}$, $H = 90\text{mm}$, ensuite à $m = 7$. Elle se stabilise à cette valeur pour $H = 90$. Par contre, pour $H = 70\text{mm}$, elle décroît et atteint la valeur $m = 6$. Pour la hauteur $H=120$, l'onde azimutale apparaît à $m = 5$, ensuite décroît à $m = 4$.

3.2 Etude des instabilités avec deux fluides immiscibles

Dans cette partie, notre travail est consacré à l'étude des effets du taux de remplissage Γ_2 , de la hauteur H_2 du fluide léger situé au dessus d'un fluide plus dense de hauteur H_1 . Cette démarche a pour objectif la détermination du nombre de Taylor critique Tc , correspondant à l'apparition des différentes formes des instabilités hydrodynamiques dans le fluide de base H_1 , connues dans le système de Taylor couette représenté sur la figure 5.

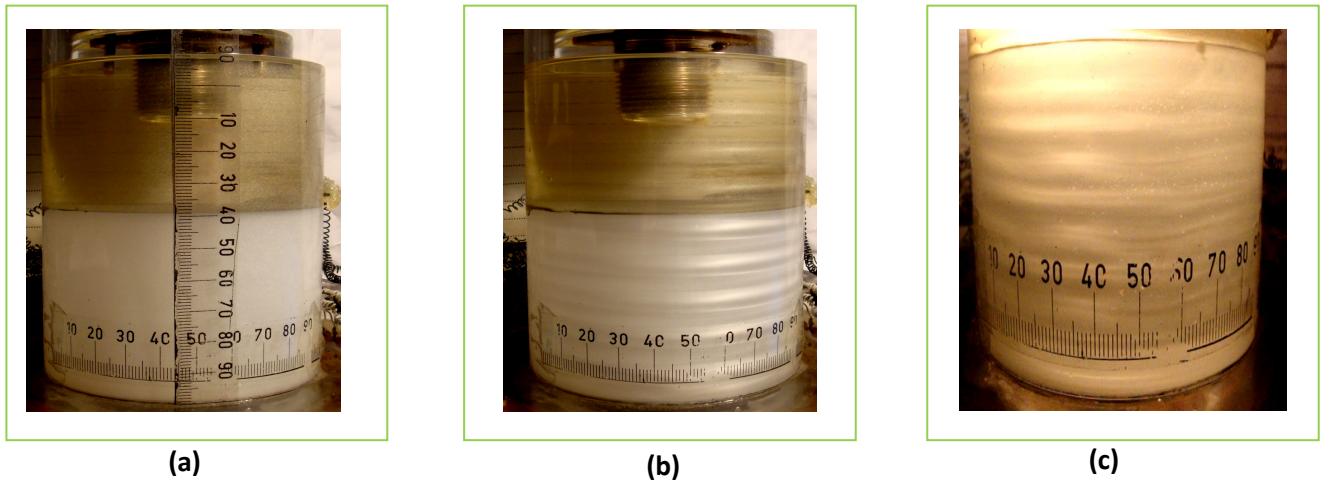


FIG. 5 – Les instabilités observées pour $\Gamma_1 = 10$, $\Gamma_2 = 8,33$. (a) Régime laminaire stable $T_a < 41$, (b) Première instabilité (cellules de Taylor) $T_a = 283,34$, (c) deuxième instabilité régime d'ondes azimutales. $T_a = 373,2$.

Dans l'intervalle $0 \leq Ta < T_{c1}$, le régime d'écoulement de base est un mouvement homogène, laminaire stable (figure 5a). L'apparition de l'onde axiale ne semble pas être affectée par le facteur d'aspect, combiné à l'interaction d'un deuxième fluide. Le nombre de Taylor critique reste inchangés $T_{c1} = 41 \pm 2$. Le début d'oscillation des cellules de Taylor (T_{c2}), est très sensible à la présence d'un second fluide. Cependant, nous remarquons que les conditions d'apparition de l'onde azimutale dans le fluide dense ne sont pas affectées par la présence du fluide léger (Γ_2) dans le cas du taux de remplissage $\Gamma_1 = 15,83$ (FIG. 6). La valeur de T_{c2} reste inchangée lorsque Γ_2 varie.

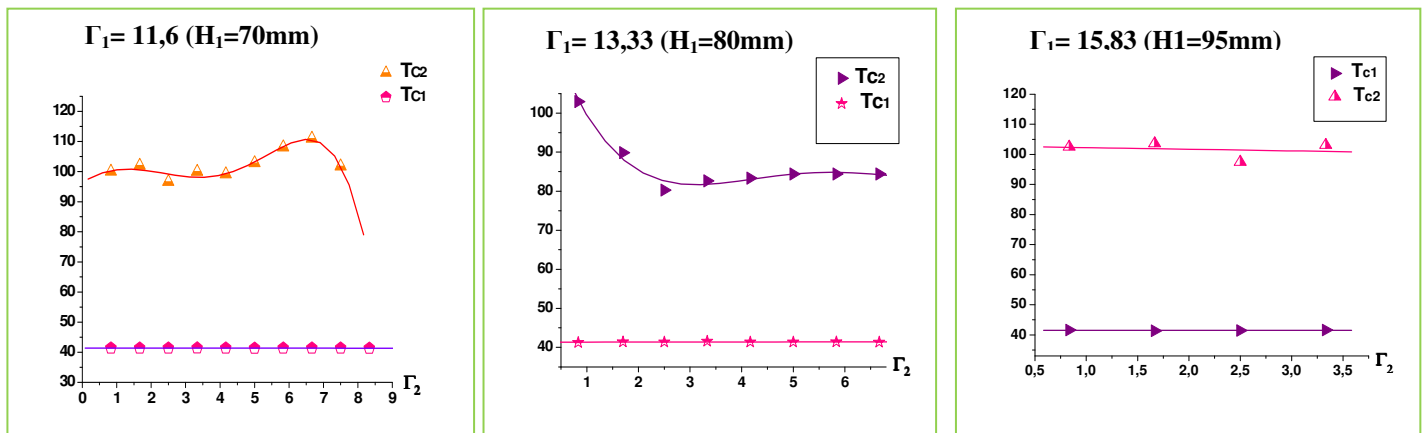


FIG. 6 – Evolution du nombre Taylor critique en fonction du taux de remplissage du second fluide Γ_2 , pour $\Gamma_1 = 11,6$, $\Gamma_1 = 13,33$ et $\Gamma_1 = 15,83$.

Dans nos expériences on a examiné le comportement du nombre de cellules axiales (n) et circonférentielles (m), sous l'effet du taux de remplissage du seconde fluide Γ_2 (FIG. 7).

On note que le nombre (n) reste inchangé pour un taux de remplissage Γ_1 fixé et ce, quel que soit le taux de remplissage du deuxième fluide Γ_2 . On remarque, lorsque Γ_1 change, une croissance de $n = 12$ pour $\Gamma_1 = 11,6$ et $\Gamma_1 = 13,33$ à $n = 16$ lorsque $\Gamma_1 = 15,83$.

Le nombre d'onde circonférentielle m est très influencé par la présence d'un second fluide. En effet, pour un taux de remplissage $\Gamma_1 = 11,6$, on mesure $m = 7$ à l'apparition de l'onde azimutale. Ce nombre est ensuite modifié selon le taux de remplissage comme le montre la figure 7.

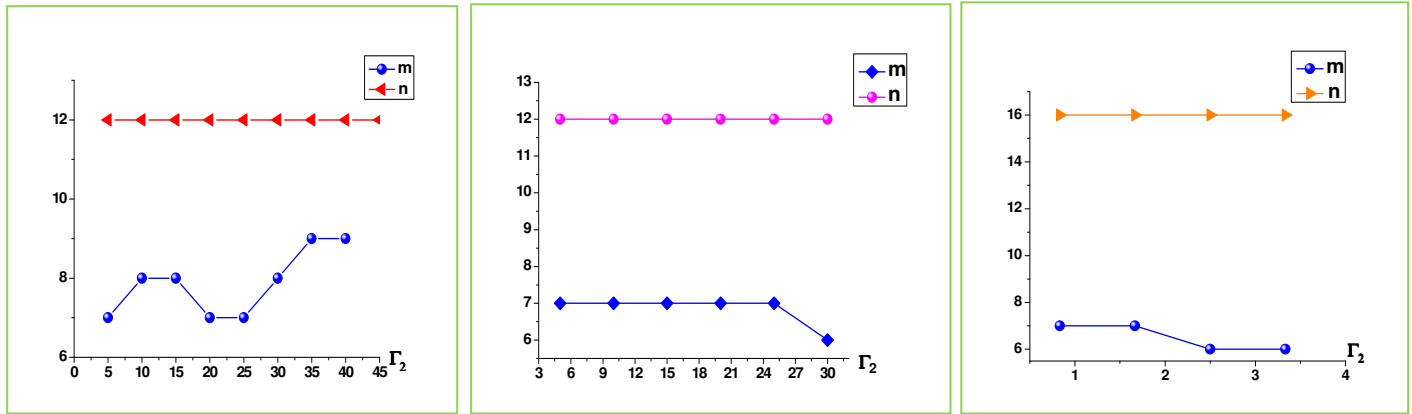


FIG. 7 – La variation du nombre de cellules axiales (n) et d'ondes circonférentielles (m), en fonction du taux de remplissage Γ_2 pour $\Gamma_1 = 11.6$, $\Gamma_1 = 15$ et $\Gamma_1 = 20$, en utilisant deux fluides immiscibles.

4 Conclusion

Cette étude préliminaire, nous a permis de mettre en évidence l'effet de deux fluides immiscibles sur l'écoulement de Taylor-Couette. L'apparition de l'onde azimutale semble sensible à l'effet du taux de remplissage. Cette instabilité n'est pas observée dans les deux cas étudiés pour un facteur d'aspect critique $\Gamma_C < 10$; la transition vers le régime chaotique s'effectue directement. Cependant l'apparition des cellules de Taylor et leur taille ne sont pas affectées par la présence d'un second fluide. Cette étude sera complétée par des mesures quantitatives utilisant la technique polarographique.

References

- [1] G., I., Taylor, Stability of viscous liquid contained between two rotating cylinders, Philos, Trans, 223, 1923.
- [2] Y., Renardy, D., D., Joseph, Couette flow of two fluids between concentric cylinders, J. Fluid Mech, 150, 381-394, 1985.
- [3] D., D., Joseph, P., Singh, K., Chen, Couette flows rollers emulsions tall Taylor cells phase separation and inversion and chaotic bubble in Taylor Couette flow of two immiscible liquids, IMA Preprint, 616, 1-27, 1990.
- [4] G., Baier, M., D., Graham, Two fluid Taylor Couette flow Experiments and linear theory for immiscible liquids between corotating cylinders, physics of fluids, 10, 12, 3045-3055, 1998.
- [5] A., L., Yarin, P., Z., Bar-Yoseph, Convection induced enhancement of mass transfer through an interface separating two immiscible liquids in a two layer horizontal annulus, Physics of fluids, 15, 3, 790-798, 2003.
- [6] L., Jie, Y., Renardy, Numerical Study of Flows of Two Immiscible Liquids at Low Reynolds Number, Siamreview, 42, 3, 417-439, 2000.
- [7] Y., Toya, I., Nakamura, Instability of two fluid Taylor vortex flow, Trans Jpn soc, Mech. Eng, 35-63, 1997.
- [8] A., Mahamdia, Hydrodynamique des écoulements tournants application au mouvement de Taylor Couette en géométrie finie, Thèse Doctorat, 2005.
- [9] J., A., Cole, Taylor vortex instability and annulus length effects, J. Fluid Mech, 75, 5-12, 1976.